

(4) 降雨時流出負荷量算定のための回帰モデル

REGRESSION MODELS FOR ESTIMATING OF STORM RUNOFF LOADING

海 老 瀬 潜 一 *

Senichi EBISE **

ABSTRACT; Because storm runoff loading in a river is larger in comparison with loading in same period of dry weather day, the author proposes following regression models to estimate its loading. Plotting the relationships between sum of loading a unit area ($\Sigma L_{\text{gross}}/A$) and sum of flow a unit area ($\Sigma Q_{\text{gross}}/A$) in direct runoff period by storm events on logarithmic paper, the points are in a restricted range and are expressed as an exponential equation, $\Sigma L_{\text{gross}}/A = a \cdot (\Sigma Q_{\text{gross}}/A)^n$, by regression analysis. Similarly, for net loading by direct runoff (ΣL_{net}) which is subtracted sum of loading in same period at dry weather day (ΣL_{base}) from ΣL_{gross} , a regression equation is obtained with net discharge (ΣQ_{net}), $\Sigma L_{\text{net}}/A = a \cdot (\Sigma Q_{\text{net}}/A)^n$. And also, net loading a unit area ($\Sigma L_{\text{net}}/A$) could be expressed as regression equations with ΣQ_{net} , observation period (T_{dir}) or rainfall duration period (T_{rain}) and area of basin (A) as following: $\Sigma L_{\text{net}}/(A \cdot T_{\text{dir}}) = a [\Sigma Q_{\text{net}}/(A \cdot T_{\text{dir}})]^n$; $\Sigma L_{\text{net}}/A = a [\Sigma Q_{\text{net}}/(A \cdot T_{\text{rain}})]^n$. Using observation data (28 cases) of influent rivers into the Lake Kasumigaura, regression equations of four types are obtained for almost all water quality indicators with high regression coefficients. Especially, these four regression models could be applied not only for total and particulate component loadings but also for dissolved component loading.

KEYWORDS; storm runoff loading, direct runoff, particulate matter, dissolved matter, input loading

1. 降雨時流出負荷量算定の必要性と問題点

湖沼・ダム湖や内湾・内海など閉鎖性水域における水質汚濁や富栄養化現象の制御には、正確な総流入負荷量の把握が必要である。また、これらの水域での水質変化のシミュレーション解析には、入力として、変動も含めた精度の高い流入負荷量値が必須であり、この入力の精度がシミュレーション解析の精度を左右することになる。しかし、これまでは降雨時に流入する負荷量が総流入負荷量の中で大きなウェイトを占めるほか、豪雨による流入負荷量が閉鎖性水域の水質を一変させるほどの変化をもたらすことが認識されながら、河川での降雨時流出負荷量の調査が十分行なわれているとは言えない。それゆえ、閉鎖性水域への流入負荷量の算定は、晴天時の流入負荷量調査や晴天時の流出率・流達率調査を併用した原単位積み上げ方式によるものがほとんどであり、その総流入負荷量としての精度や時間変化の捉え方が十分ではない。

河川を流出する負荷量のその変動をも含めた定量的な実態把握は、河川それぞれの規模や流域特性に基づく水量および水質変化現象に対応する観測頻度の不足のために困難を伴うことが多い。これには過去に行なわれた河川流出負荷量調査の蓄積資料が乏しく、その観測精度にも大きな差違の見られることが原因となっている。とくに、面源負荷は降雨を介して流出する特性を有しているにもかかわらず、その総流出負荷量の算定には降雨時流出分の評価が十分なされているとは言えない現状である。これは、種々の降雨条件を考慮し、かつ、多くの流域で実測調査を実施することの困難さや、面源負荷自体の潜在的な流出特性によるところが多い。例えば、定期的に行なわれている公共用水域の測定結果も、水質濃度のみ記載されている場合が多く、流量観測が同時になされておらず水質負荷量データとしては利用できない実状である。とくに、流量

*国立公害研究所 水質土壌環境部, **Water and Soil Environment Division, The Institute of National for Environmental Studies.

および水質濃度とも変動の大きな降雨流出時は、作業量の増加や作業の困難さもあって調査が避けられる傾向にあり、ときたまそのような観測値が存在しても異常値と判断され、統計上の計算（例えば、平均値の算出）では除かれることもある。

この実測調査を補うための流出負荷量算定モデルの研究では、現象把握の時間スケールのいろいろな段階ごとに降雨時流出分の負荷量を算定するモデルが提案され、検討されている。しかし、各研究者が用いる専門用語の不統一やあいまいさも完全に解消されたわけではなく、モデルやパラメータの相互の比較・検討が十分できない場合もある。この根本的な背景として、同程度の観測緻密度（流出負荷量の時間変化現象と観測間隔および観測継続時間の対応関係）や観測精度（水質濃度分析と流量観測の測定精度）を保持するデータの絶対数の不足がある。このような現状にもかかわらず、近年の湖沼・ダム湖や内湾・内海など閉鎖性水域における富栄養化現象に対する精度の高い流入負荷量算定の緊急の要請がある。これには、流入負荷量において大きなウェイトを占める降雨時流出分の大きさの明確化にとどまらず、藻類が直接利用可能な栄養塩のウェイト、あるいは、停滞水域では底泥へと移行する沈降成分のウェイトのように、存在形態別の流出負荷量を明らかにすることまで含まれている。本論文は、これらの要請に答えるべく、著者がすでに提案した降雨時流出負荷量算定モデルをもとにして、同じ精度レベルでのモデルの議論やデータの相互比較を可能ならしめるために、使い易く、かつ、水質形態別流出負荷量の段階まで拡張した定量的な解析法の提案である。

2. 水文条件・流域特性と基本モデル

降雨に伴う流出負荷量を左右する大きな要因として、水文条件と流域特性がある。水文条件としては、一連の降雨の総降雨量、降雨強度、降雨継続時間、降雨の時間変化パターン、先行降雨の大きさ、先行晴天日数などがある。流域特性としては、地形、地質、勾配、土地利用形態、植生、地表面の浸透率などがある。これらによって流出水量、流出負荷量がかなり異なるため、それぞれの要因ごとに定量的な関係を明らかにしておく必要がある。その定性的な関係や一部限定された場合の定量的な関係はかなり明らかにされているが、実際の流域では各種の要因が複合化しており、全体としての定量的な関係は現在も検討の段階にある。したがって、ここにこれらの要因の多くを併せて代表できる因子を見い出して、定量的に流出負荷量を推定する単純なモデル構築の理由がある。ここで展開するのは、一連の降雨の結果としての総流出負荷量の算定モデルであり、別の手法である降雨流出時の流出負荷量の経時変化を追跡するモデル式を時間積分するのとは、算定のレベルを異にする。

降雨流出の結果としての流出負荷量算定には、その時の水文条件や流域特性を最もよく反映する因子として総流出流量が考えられる。流出負荷量観測が水質濃度と流量の観測から成っていることから妥当と言える。しかし、任意あるいは仮定の降雨に対する総流出負荷量の予測や推定には、手に入る水文量としては降雨量の場合が多い。降雨量のうち、高水期間に流出する直接流出流量を推定する方法は、実際に観測されたハイドログラフの分離によるものと、降雨量から推定するものに大別される。流域の水文量として精度が良く、かつ、容易に取得可能なものは降雨量である。河川流量が常時観測されているのは大河川か治水上重要な河川に限られており、そのほとんどが水位－流量曲線によっている。したがって、河川流量の連続観測値の存在は期待できない。一降雨の降雨量から直接流出となる総流出水量あるいは有効雨量を推定するには、経験的かつ統計的に幅をもたせた値で表わされる流域特性別の流出係数がある。この流出係数を一応の目安として参考にできるが、本来、各河川ごとの流出流量調査に基いて求められるべきものである。したがって、今後のモデルの展開では、一降雨の降雨量のうち直接流出となる総流量あるいは有効雨量が何らかの手段（実測値や流出モデルによる推定値）で既知であることが前提条件である。

3. 基本モデルの特性

一降雨の直接流出期間における懸濁態成分の累加流出負荷量（Y軸）の累加流出流量（X軸）に対する両対数紙上の経時変化は、Fig. 1のように流出末期には一定値に漸近するとき増加の頭打ち現象が出現する。^{1), 2)} また、この両累加量の最終時刻の値、すなわち、総流出負荷量（Y軸）の総流出流量（X軸）に対する値を

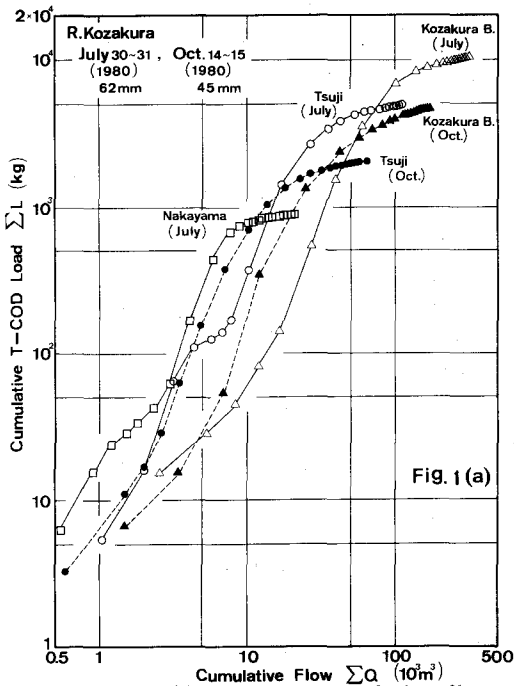
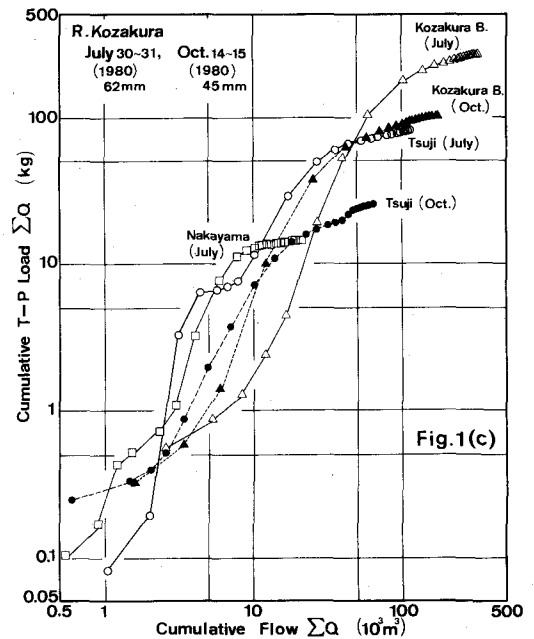
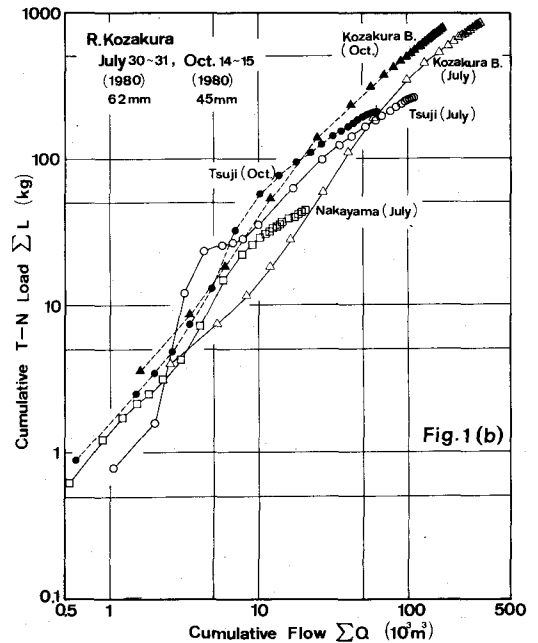


Fig.1 Relationships between cumulative flow and cumulative loading of T-COD (a), T-N (b) and T-P (c) during a direct runoff period.

両対数紙上にプロットすると、その数多くの降雨ケースについてプロットされた値がある限られた範囲内に分布する^{3),4)} 本来は、1つの河川の地点ごとに多くの観測を実施し、各水質項目ごとにその範囲を回帰関係として捉えることになる。しかし、各河川の各地点ごとの観測値の絶対数不足と、各流域ごとの観測値の相互比較のための一般化を考慮して、流出負荷量、流量ともその流域面積で除した単位面積当りの流出負荷量（比流出負荷量）と単位面積当りの流量（比流量）として示した例が Fig. 2 である。したがって、直接流出期間の単位面積当りの総流出負荷量と総流量は、それぞれ、(kg/km²)等で表わされる流出負荷量原単位と(mm)等で表わされる有効雨量とになり、流域規模の差違による影響は除ける。

一般に、流量増加に伴い濃度増加を呈する水質項目の場合、前述の流出負荷量の頭打ち現象が顕著なため相関係数の高い回帰式となる。また逆に、流量増加に伴い大きな濃度減少を呈するような水質項目では相関係数の低い回帰式となる。しかし、ここで最も問題となるのは、現場観測あるいは観測結果における直接流出期間の終端の決定である。降雨量や降雨強度の小さな降雨についてはとくに不明瞭であり、直接流出期間の取り方の不揃いは回帰モデルの精度を左右する。この水文学的な定義はあるものの、一降雨の直接流出期間の終端を観測現場で正確に判断することは困難なことが多いし、経験の多少や個人差が入り込む余地がある。とくに、降雨流出が長びくような場合、観測現場での調査打ち切りの判断は仕事量とも関係して当事者にとっては切実な問題である。この直接流出期間判定の不一致による調査結果の不揃いを、算定精度の低下を抑えつつ、かなりの程度で許容できる算定法を提案する。すなわち、いろいろな河川で多くの人によって



得られた降雨時流出負荷量の貴重な調査結果を、同じベースで比較検討し、統計モデルに組み込むための提案とも言え、手法的には簡便なものが望まれる。

これには、前述の降雨流出の末期における累加流出負荷量の累加流出流量に対する頭打ち現象を利用して、一定の範囲の降雨に対して、一連の降雨による総流出負荷量を直接流出期間で算定する代りに観測期間で算定する方法である。この算定方法でも、得られる回帰式の精度を下げないために、その前提条件として、一連の降雨による流出の、①降雨自体は降り終わっていること、②流量の最大ピークは捉えていること、③最終の観測時が流量の減衰期に入っていること、が最低限の必要条件である。累加流出流量に対する累加流出負荷量の算定は、見方を変えれば、累加流出流量に対する直接流出期間という時間を限定した期間内の平均濃度を算定していることに相当する。したがって、流量・水質濃度とも経時変化する流出現象で、その平均時間のある程度厳密にしなければ、その算定モデルの精度に影響が及ぶことは自明である。ただ、ある程度の大きさの降雨になると、直接流出末期の累加流出負荷量は頭打ち現象のために総流出負荷量に近く、観測期間が直接流出期間より短くなっても、結果的には両期間の違いが算定精度にあまり影響を及ぼさないという一面がある。この場合、流量に関しても、両期間による総流出流量の差が小さく、直接流出期間の有効雨量と観測期間の単位面積当りの降雨時流出分流量が近似的に等しいと見なせることが多い。この利点を利用したのが今回提案のモデルである。この手法では、利用目的に応じて何段階かのモデルの展開が可能であり、以下に4つの段階のモデルを示す。

第1モデルは、以下の基本モデルでもあり、直接流出期間あるいは一定の要件を満たした観測期間中に流出する総流出負荷量と総流出流量の関係の回帰モデルである。これは基底流量とそれに対応した基底流出負荷量（先行降雨の直接的な影響のない状態下の晴天時流出負荷量）を含んだままのモデルである。^{3,4)} したがって、晴天時流出負荷量が降雨時流出負荷量に比べて無視できたり、晴天時流出負荷量の観測値が存在しない場合に利用できるモデルである。

第2モデルは、直接流出期間あるいは一定の要件を満たした観測期間中に流出するもののうち、直接流出分に当る有効雨量と総流出負荷量との関係の回帰モデルである。対象とする降雨の降雨時流出分に当る流出負荷量と流出流量を必要とするため、観測される負荷量・流量からそれぞれ基底負荷量・基底流量を差し引かねばならない。したがって、晴天時流出負荷量が大きく、その調査が行なわれている河川では、晴天時流出分と降雨時流出分の流出負荷量の対比に利用できる。

第3モデルは、直接流出期間あるいは一定の要件を満たした観測期間の時間当りに流出する直接流出分の流出流量と流出負荷量の回帰モデルである。これは、降雨流出の結果としての時間平均の流出強度と言うべき時間流出高と、時間平均の流出負荷量原単位の関係となり、第2モデルと同様に、基底流量・基底流出負荷量を差し引いた降雨時流出分の解析である。

第4モデルは、直接流出期間あるいは一定の要件を満たした観測時間に流出する直接流出分の総流出負荷量と、その総流出流量の降雨のあった実質的な時間で除した平均有効降雨強度の回帰モデルである。これは、流出に寄与した有効雨量の平均強度と流出負荷量の関係であり、地表面に堆積する懸濁態物質の表面流による流出や河床に沈殿・堆積する懸濁態物質の増水時の流出の関係の明確化が期待できる。すなわち、SSや懸濁態成分についての流出負荷量が平均有効降雨強度との原因-結果の関係として扱えられる。

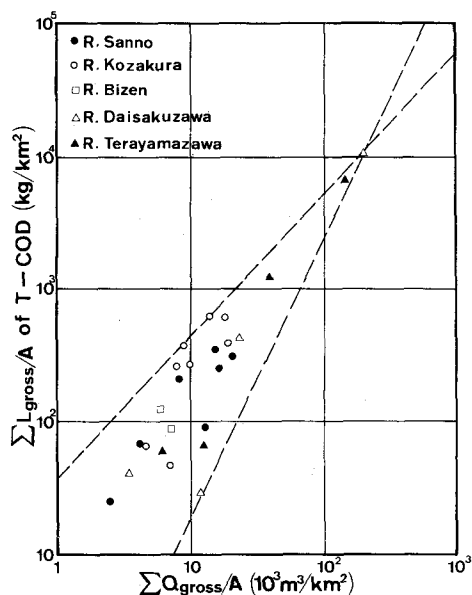


Fig.2 Relationship between specific cumulative flow and specific cumulative loading of T-COD.

スに加えて、それぞれの観測地点全てで晴天時流出負荷量調査も併せて実施している。

ここで解析の対象とする水質項目の測定方法および定義は、Table 2 に示すとおりである。水質項目として、ろ過前の試水については Total を付して表示し、そのろ水の試料は溶存態成分として D を付して示し、両者の差を懸濁態成分として P を付して表示する。いずれの降雨時流出の観測ともその観測時間は、短期変化としての直接流出期間にほとんど等しくなるよう、流量変化および河川水の濁度変化から観測の打ち切りを判断した。観測時間間隔は通常は 1 時間間隔であるが、流出前半の水質濃度・流量急変時には 15～30 分間隔、流出後半の流量逓減期には、1.5～2 時間間隔としている。

5. 回帰モデルの検討

5.1 Total および懸濁態成分

前出の Fig.1 では Total の水質項目について一連の降雨による累加流出流量に対する累加流出負荷量の直接流出末期の頭打ち現象を示した。懸濁態成分についての同様の現象を Fig. 4 に示す。当然のことながら COD, N, P とも Total の場合よりもさらに頭打ち現象の顕著なことが認められる。したがって、Total および懸濁態成分については、第 1 から第 4 モデルまでの適用ができる。

第 1 モデルは、すでに公表済みのモデルであるが、既発表の場合より観測河川数と観測地点数、したがって観測回数が大幅に増加しており、霞ヶ浦流域内の小河川という大グループの中ではあるが、市街地流域、山地流域、農耕地流域など流域の土地利用状態、降雨条件では 7～195 mm の範囲内の種々の観測ケースが含まれている。T-COD については前出の Fig.2 に示したが、他の水質項目についてもほぼ同様の結果であった。流域の土地利用形態の相違による分布の特性はあまり明瞭ではなく、 ΣQ_{gross} の大きなもの、したがって降雨量と降雨強度の大きなものが図上で右上に、小降雨量のものが図上で左下にくる配置となっている。同じくらしい ΣQ_{gross} のデータが多い場合にはバラツキが目立つこともある。これは晴天時流出分を含んだままの流出流量や流出負荷量であるため、降雨時流出分に比べて晴天時流出分が無視できたり、晴天時流出分の観測値がない場合に利用できる。

第 2 モデルは、流出流量、流出負荷量とも晴天時流出分を差し引いた降雨による結果としての正味の降雨時流出分のモデルである。T-N と P-N の観測値の分布を Fig.5 に示す。N の場合は、T-N の方が P-N より狭い範囲に分布するが、COD では Total と懸濁態成分ともほぼ同じくらい、P では懸濁態成分の方が Total より狭い範囲のまとまった分布となる。第 1 モデルの場合よりも、人為的な汚濁負荷のウエイトの高い市街地流域を有する観測地点（山王川中・下流部地点と備前川下流部地点）では T-P など、山地河川

Table 2 Water quality indicators and their analytical methods.

Item	Method
SS	Glassfiber filter method
T-COD D-COD P-COD	Alkali-potassium-permanganate method at 100°C (T-COD) - (D-COD)
T-N, D-N	nitrification by oxidation with potassiumperoxodisulfate and method for NO ₃ -N (Cu-Cd reduction method)
P-N	(T-N) - (D-N)
T-P, D-P	decomposition to PO ₄ ³⁻ -P with potassiumperoxodisulfate and method for PO ₄ ³⁻ -P (molybdate-blue method)
P-P	(T-P) - (D-P)
T-SiO ₂ D-SiO ₂	decomposition to SiO ₂ with potassiumperoxodisulfate and method for SiO ₂ (heteropoly-blue method)
P-SiO ₂	(T-SiO ₂) - (D-SiO ₂)
Cl ⁻	mercuric thiocyanate method
Flow	propeller-typed current meter

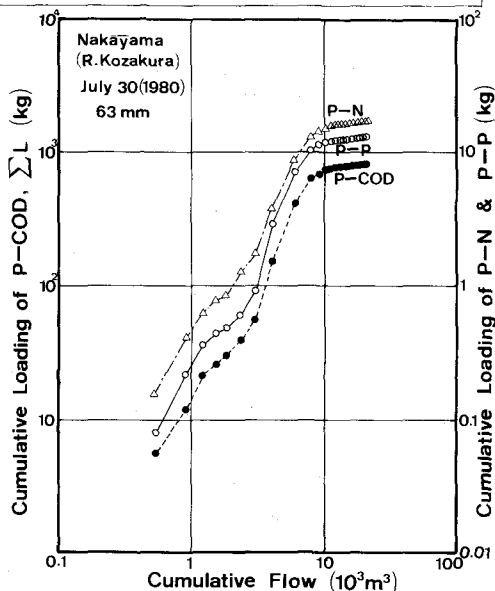


Fig. 4 Relationship between cumulative flow and cumulative loading of particulate matters during direct runoff.

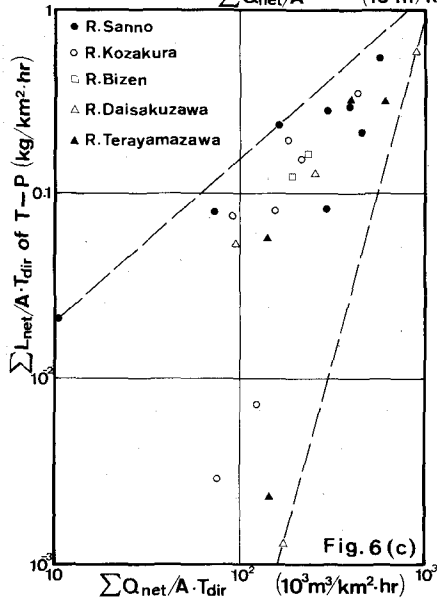
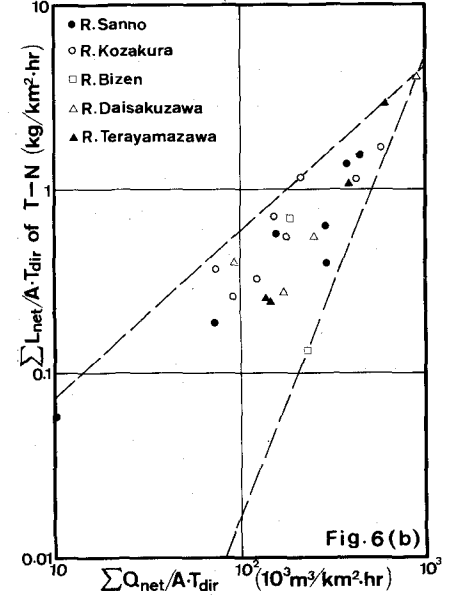
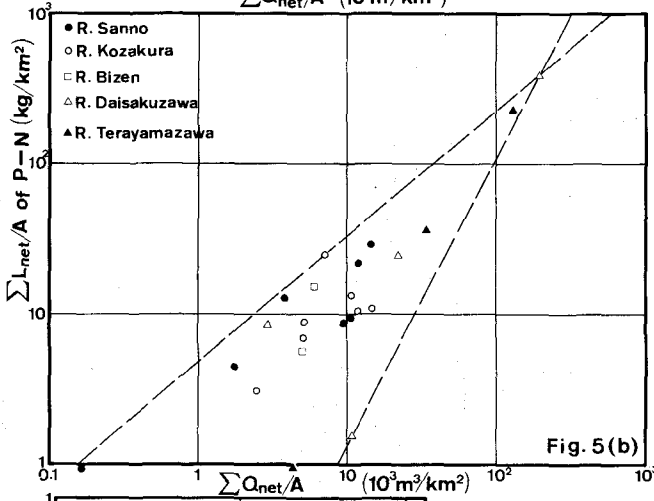
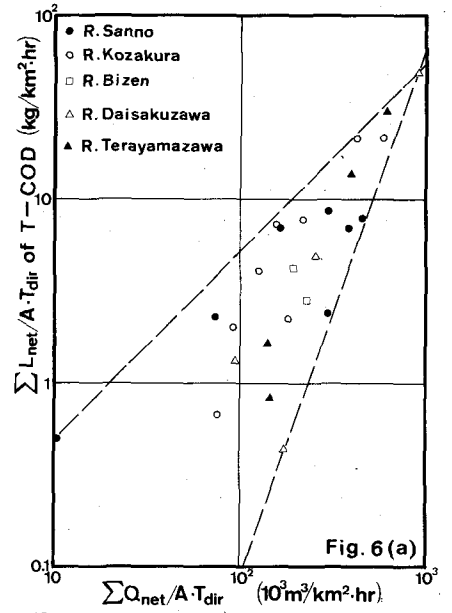
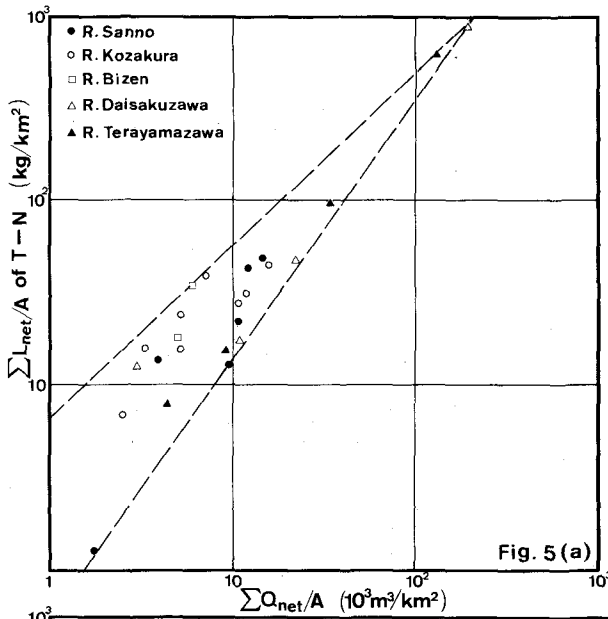


Fig. 5 (a), (b) Relationships between specific cumulative flow and specific cumulative loading of T-N(a) and P-N(b) by storm runoff.

Fig. 6 (a), (b) and (c) Relationships between $\Sigma Q_{net}/(A \cdot T_{dir})$ and $\Sigma L_{net}/(A \cdot T_{dir})$ of T-COD (a), T-N(b) and T-P (c).

流域のそれ（大作沢と小桜川上流部地点）と比べて若干高い $\Sigma L_{net}/A$ の値を呈する分布となっている。流域特性の差違が分布に反映されるのが認められるが、おおよその傾向は第1モデルと同じである。

第3モデルは、直接流出期間あるいは観測時間当りの降雨時流出分の流出流量と流出負荷量の関係である。Fig. 6にT-COD, T-N, T-Pの例を示す。T-CODとT-Nの狭い範囲での分布に比べてT-Pのパラッキが目立つ。D-Pについては狭い範囲に分布してパラッキは見られない。降雨量の小さな場合や降雨強度の小さな場合には、D-P/T-Pに観測時間の取り方が大きく影響する可能性が考えられる。直接流出期間あるいは観測期間の時間当りの降雨による平均比流出流量と平均比流出負荷量の関係になるため、降雨時流出の流量や水質濃度に大きな変化が見られない場合は、観測時間の長短の両者への影響が大きくなると考えられる。

第4モデルでは、直接流出期間あるいはそれに近い観測期間に流出した降雨時流出分の流出負荷量と、それに対応した流出流量を実質的な降雨継続期間で除した平均有効降雨強度との関係と見ることができる。原因としての降雨入力を有効降雨強度で代表させ、結果としての降雨時流出分の流出負荷量の関係と見ため、降雨に対する流出強度のような捉え方ができる。Fig. 7にT-COD, T-N, T-Pの例を示す。T-Pのパラッキが目立つのは、第3モデルの場合と同様の理由である。この第4モデルでは原因と結果の関係が明確になるが、第3モデルに比べると、観測値の分布のまとまりが少し悪くなる傾向にある。

5.2 回帰式の一括表示

5.1での分布の状態を統計的な回帰式として、各モデルに対して各水質項目について一括して示したものがTable 3である。全般的に見れば、第1・第2モデルに比べて第3・

第4モデルの相

関係数は低下す

る。さらに、第

4モデルは第3

モデルより相関

係数が低下する

傾向にある。こ

れは、多くの河

川、流域特性の

異なる多くの観

測地点、あるい

は、種々の降雨

条件のものをま

とめて解析した

ことにも原因が

あろう。ちなみ

に、市街地河川

の山王川の7つ

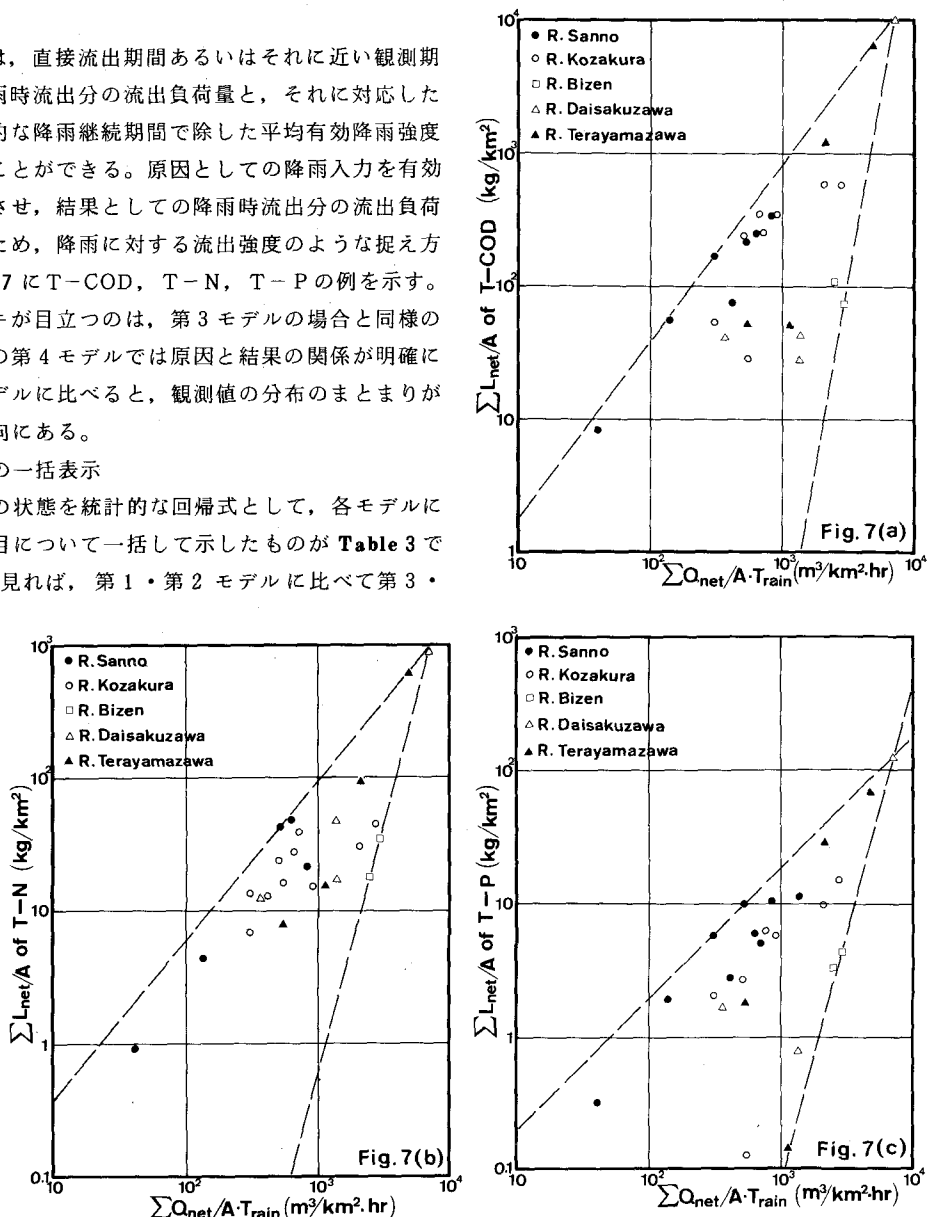


Fig. 7 (a), (b) and (c) Relationships between effective rain intensity and specific cumulative loading of T-COD (a), T-N (b) and T-P (c).

の観測ケースだけについて同様の回帰式を求めると、相関係数が非常に良いことは言うまでもないが、指数 n の値が25個の観測ケースの場合とかなり異なることがわかる。7つの観測ケースのうちの5つを占める中流部と下流部の観測値に市街地部の影響が色濃く反映され、山地部のウェイトの高い大作沢や寺山沢の場合と比べて、指数 n が小さく、したがって係数 a が大きくなる傾向にあった。また、降雨量がある程度大きくなれば、指数 n と係数 a の流域ごとの差は少なくなるが、降雨量の小さい場合には流域ごとのその差は大きくなる。また、降雨量が小さい場合は、晴天時流出分が高負荷量の市街地河川では、降雨時流出分の観測値の精度もさることながら、晴天時流出分の観測値の精度の回帰モデルに与える影響が大きいと考えられる。

一般には、降雨時流出負荷量のベースとなっている晴天時流出負荷量が河川ごと、すなわち、点源負荷の流出を主体する流域内の負荷特性によって異なるほか、面源負荷の流出を主体とする降雨時流出負荷量の流出特性も河川によって異なる。最も典型的なパターンとしては、市街地河川あるいは都市河川と山地河川が両極端に位置し、この両者に挟まれた範囲内に田園地河川や中間的な性格の河川の観測値が分布することになる。

また、 $T-SiO_2$ や $P-SiO_2$ も測定データが少いながら、SS と非常によく似た挙動を示すため、Total および懸濁態成分のグループに入れて同様の解析が可能であり、同様に、 $D-SiO_2$ も次の溶存態成分のグループの中に入れて取り扱える。ここでは、 SiO_2 を測定したデータが少いため、回帰式表示には加えなかった。

5.3 溶存態成分

溶存物質あるいは溶存態成分も降雨時流出負荷量としては、懸濁物質あるいは懸濁態成分ほどではないが、晴天時流出分の数倍から10倍前後とかなり多量に流出する。この場合、先述の累加流出流量に対する累加流出負荷量の直接

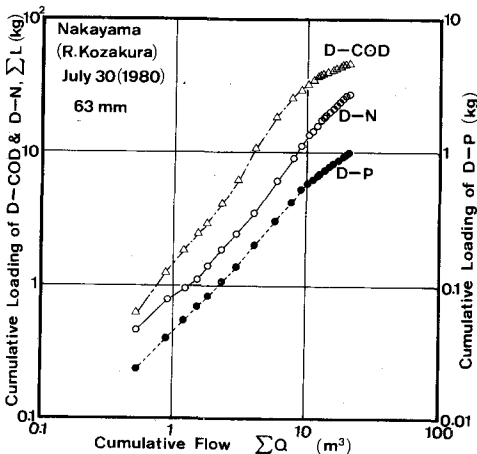


Fig. 8 Relationships between cumulative flow and cumulative loadings of dissolved matters during direct runoff.

Table 3 List of regression equations. [ΣL (kg); A (km²); ΣQ (m³); T (hr)]

	First Model	Second Model	Third Model	Forth Model
	$\Sigma L_{gross}/A = a \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^n$	$\Sigma L_{net}/A = a \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^n$	$\frac{\Sigma L_{net}}{A \cdot T_{dir}} = a \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^n$	$\Sigma L_{net}/A = a \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{rain}} \right)^n$
SS	$0.000202 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.691}$ ($r = 0.876$)	$0.01312 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.300}$ ($r = 0.865$)	$0.02116 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.422}$ ($r = 0.779$)	$0.1577 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{1.368}$ ($r = 0.753$)
T-COD	$0.000697 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.339}$ ($r = 0.898$)	$0.01551 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.042}$ ($r = 0.870$)	$0.01408 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.089}$ ($r = 0.830$)	$0.1606 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{1.045}$ ($r = 0.723$)
P-COD	$0.000122 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.487}$ ($r = 0.873$)	$0.001877 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.235}$ ($r = 0.855$)	$0.001582 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.433}$ ($r = 0.792$)	$0.03209 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{1.229}$ ($r = 0.704$)
T-N	$0.00236 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.027}$ ($r = 0.953$)	$0.00436 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.962}$ ($r = 0.954$)	$0.00442 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.932}$ ($r = 0.900$)	$0.02482 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{1.027}$ ($r = 0.844$)
P-N	$0.000329 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.110}$ ($r = 0.834$)	$0.000767 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.060}$ ($r = 0.740$)	$0.000561 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.138}$ ($r = 0.697$)	$0.02533 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{0.895}$ ($r = 0.623$)
T-P	$0.000363 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.032}$ ($r = 0.833$)	$0.001386 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.876}$ ($r = 0.669$)	$0.000393 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.028}$ ($r = 0.571$)	$0.01356 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{0.833}$ ($r = 0.526$)
P-P	$0.000126 \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{1.114}$ ($r = 0.784$)	$0.001844 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.881}$ ($r = 0.949$)	$0.001617 \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.824}$ ($r = 0.877$)	$0.01292 \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{0.894}$ ($r = 0.798$)

流出末期の頭打ち現象は、Fig. 4 の懸濁態成分はど明瞭ではないが、Fig. 8 に示すようになかなり類似した傾向にある。したがって、Totalや懸濁態成分の水質項目と同様の算定を行なうと、Fig. 9 に示す $\Sigma Q_{\text{net}}/A$ と $\Sigma L_{\text{net}}/A$ の関係のように、相関係数としては十分高い回帰式が得られる。もちろん、溶存態成分の場合、降雨時流出の Total および懸濁態成分の回帰モデルの精度が十分高ければ、各モデルでの両者の差としての推定可能である。しかし、現実にはその精度は低いと思われる。そこで、溶存態成分の観測値から Total や懸濁態成分の場合と同様の方法で直接回帰式を求める。得られた回帰式は Table 3 と同様に、一括して Table 4 に示す。D-P の第3モデルの相関係数の低さは、Table 3 の T-P の第3モデルの場合と同じ原因と考えられる。懸濁物質の SS と同様に、溶存物質の Cl⁻ は D-COD, D-N, D-P と同様の結果が得られる。

5.4 具体的な適用例

5.1 ~ 5.3 でプロットされたデータの分布状況を検討すれば、この回帰モデルは、単一河川で独自にあるいは同様の河川パターンのグループでの多くの降雨についての調査結果をもとにパラメータを決定すると、精度の高い降雨時流出負荷量の算定ができることがわかる。この回帰モデルは、1 河川の 1 降雨の降雨時流出負荷量の算定に適用できるのは無論であるが、統計モデルゆえ、一定期間内の降雨を一定の降雨量範囲内のグループに分けて、各グループごとにまとめて平均的な降雨時流出負荷量を算定すれば、降雨条件の違いによる算定値の誤差の相殺も期待できるため、長期間の晴天時流出分の負荷量と併せて精度の高い期間内総流出負荷量の算定に用いる¹⁾。また、河川パターンの違いごとに回帰モデルを求めれば、流域の土地利用形態の相違など流域特性と降雨時流出負荷量の関係を検討することも可能と考えられる。

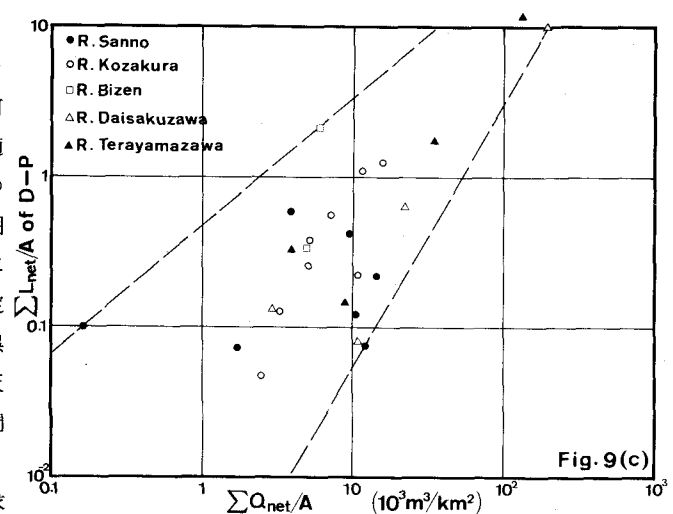
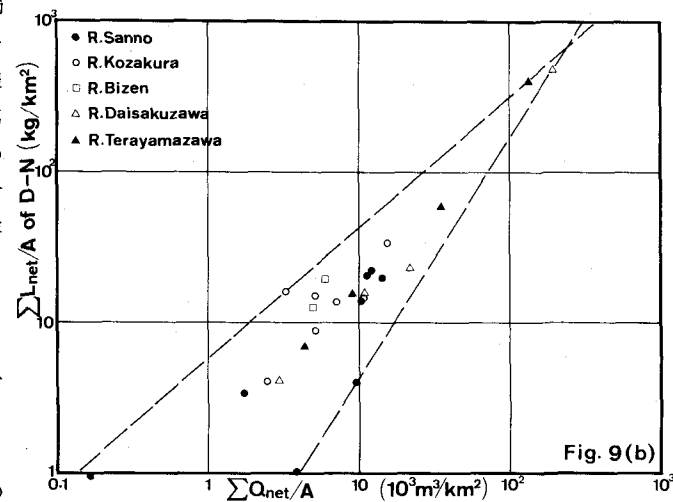
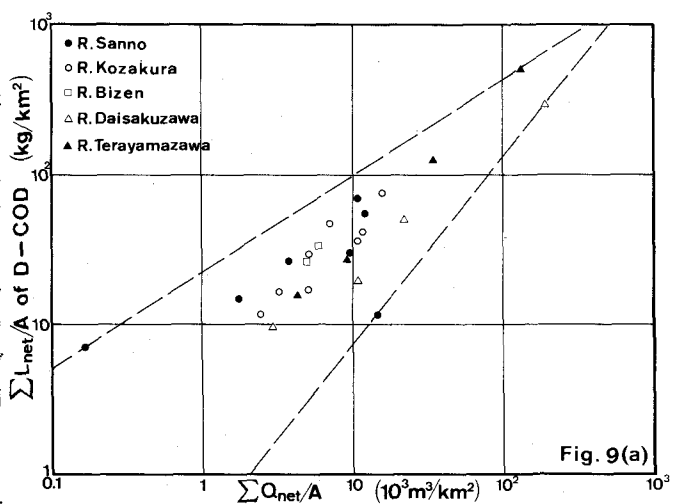


Fig. 9 (a), (b) and (c) Relationships between specific cumulative flow and specific cumulative loading of D-COD (a), D-N (b) and D-P (c) by storm runoff.

6. モデルの適用範囲と大河川への適用

降雨時流出負荷量算定モデルは、本来、各河川ごと、あるいは、流域特性の違いによる各河川パターンごと、かつ、流域規模の各段階ごとにそれぞれパラメータを決定すれば算定精度が高くなる。しかし、先述のように観測値の絶対数不足を補うためと、河川や流域相互の差違を見極めるために、流域面積の大ききで除した量での検討を行なった。対象とする降雨や流域の規模には適用範囲が存在する。対象降雨の適用範囲は、一連の降雨として、上限は200mmまでは観測例もあり有効であるが、下限は各河川ごとに降雨時流出の影響が異なるため、一応の目安は15～20mm前後である。これより降雨量が小さい場合は、たとえ降雨強度が大きくても降雨時流出の影響は短時間に終わることが多く、降雨強度の小さな降雨に至ってはその影響が小さいからである。もちろん、不透水性の地表面面積比率が高い市街地河川では、降雨量が小さくてもその流出負荷量への影響は現われるが、晴天時流出負荷量が高レベルでかつその変動も大きいためにその中に含めて取り扱ってもよい場合が多い。

流域規模については、降雨の地域分布の一樣さを保持して算定精度を高レベルに維持するためには、自ずと対象流域の規模に制限が課されることになる。ここで用いた観測値は、著者らが霞ヶ浦に流入する小河川と中河川の支流で調査を実施した流域面積20km²前後の河川ばかりである。しかし、大河川においても、それぞれの支流や本川でも、一連の降雨による直接流出流量が既知となればこのモデルの拡大適用が可能である。多摩川では大きな降雨量の降雨になれば大量の降雨時流出負荷量を生じ、それが晴天時流出負荷量と併せた年間総流出負荷量の中で大きなウェイトを占めることが市川のRipple図での研究⁵⁾からも明らかとなっている。また、宍道湖に流入する斐伊川⁶⁾、伊勢湾に流入する庄内川、三河湾に流入する豊川など⁷⁾において降雨時流出負荷量の観測がなされ、晴天時流出負荷量観測値と比較してその量の大きさが指摘されている。

これら大河川に中規模河川も含めて、先述の解析上の必要条件を満たす降雨時流出負荷量観測値に加えて晴天時流出負荷量観測値のそろっている落合らの斐伊川⁶⁾(流域面積911.4km²; 86mm, 90mm, 166mmの3回の降雨)、古田らの豊川⁷⁾(流域面積643.6km²; 21～147mmの降雨1回)、庄内川⁷⁾(流域面積620.8km²; 60～140mmの降雨1回)、矢田川⁷⁾(庄内川の支流、流域面積109.7km²; 50～80mmの降雨1回)、山本らの恋瀬川⁸⁾の下流部(流域面積218.4km²)、中流部(流域面積151.5km²)および同じく中流部(流域面積120.1km²)についての平均約50mmの降雨1回、の観測結果を対象に同様の解析を試みた。

大河川においても、降雨時流出の累加流出流量に対するTotalあるいは懸濁態の水質項目の累加流出負荷量の頭打ち現象は顕著なため、流域規模の差違による影響を除くべく流域面積当りの降雨時流出分の流出流量と流出負荷量の回帰関係(第2モデル)としてプロットしたものがFig. 10である。これはT-Pの例であるが、他のTotalやSSの水質項目についても同様の関係となっている。また、晴天時流出分を含めた流

Table 4 List of Regression equations for dissolved matters. (ΣL (kg); A (km²); ΣQ (m³); T (hr))

	First Model	Second Model	Third Model	Forth Model
	$\Sigma L_{gross}/A = a \cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^n$	$\Sigma L_{net}/A = a \cdot (\Sigma Q_{net}/A)^n$	$\frac{\Sigma L_{net}}{A \cdot T_{dir}} = a \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^n$	$\Sigma L_{net}/A = a \cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{rain}} \right)^n$
Cl ⁻	0.2212 $\cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{0.659}$ ($r = 0.794$)	0.0883 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.716}$ ($r = 0.935$)	0.0591 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.593}$ ($r = 0.809$)	0.3083 $\cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{rain}} \right)^{0.772}$ ($r = 0.834$)
D-COD	0.0206 $\cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{0.812}$ ($r = 0.892$)	0.1071 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.639}$ ($r = 0.862$)	0.0738 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.451}$ ($r = 0.620$)	0.3517 $\cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{0.677}$ ($r = 0.756$)
D-N	0.00181 $\cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{0.956}$ ($r = 0.956$)	0.00297 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.939}$ ($r = 0.896$)	0.00144 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{1.023}$ ($r = 0.756$)	0.00932 $\cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{1.085}$ ($r = 0.857$)
D-P	0.000620 $\cdot (\Sigma Q_{gross}/A)^{0.788}$ ($r = 0.759$)	0.000416 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.746}$ ($r = 0.654$)	0.000187 $\cdot (\Sigma Q_{net}/A)^{0.717}$ ($r = 0.473$)	0.000499 $\cdot \left(\frac{\Sigma Q_{net}}{A \cdot T_{dir}} \right)^{0.968}$ ($r = 0.704$)

出流量と流出負荷量の回帰関係（第1モデル）や、観測時間当りの降雨時流出分の流出流量と流出負荷量の回帰関係（第3モデル）も Fig. 10 に近い分布となっている。

Fig. 10 は、山林の流域面積に占めるウエイトが高い河川と、市街地や農耕地のウエイトが高い河川に分れて分布する傾向が認められる。これは流量についての流出率や、人為的な汚濁負荷源の差によるものと考えられる。

Fig. 10 には先述の霞ヶ浦流域の小河川で求めた回帰式も破線で図示しており、河川あるいは河川パターンによって回帰式が少しずつ異なることがわかる。この9観測値全体としての相関係数は高くはないが、さらに高い精度を要求するには、河川ごとの広範囲にわたる降雨の観測ケースの増加の必要性がこの図からも指摘できる。

また、大河川の場合、流域内での降雨分布の不均一さは無論のこと、小降雨ではその降雨時流出の影響は小さく算定の困難さが予想される。Fig. 10 より、流域内の平均降雨量でおよそ30mmを超える降雨については算定が可能であると考えられる。一般に、流域規模が拡大すれば降雨の地域分布の差が広がり、流域内の土地利用形態の複雑化も加わって、流域全体としての有効雨量の正確な推定は困難であり、流量観測値の存在が望ましい。河川の流量および負荷量の流出特性を左右する流域特性の差として顕著なものには、山地、水田、畑地、市街地などの土地利用形態別面積のウエイトのほか、下水道の普及の程度、大量の工場排水の流入の有無などを挙げることができる。それゆえ、各河川ごとの回帰式のパラメータを求めることが肝要で、さすれば回帰モデルによる算定精度も向上することになる。

7. 結 論

河川の流出負荷量において大きなウエイトを占める降雨時流出負荷量算定のために、モデルの精度の確保と利用のし易さを考慮して、著者の既発表の回帰モデルを拡張・展開し、第1から第4モデルを提案した。これによって観測値の整備状態や利用目的に応じて、最も適当な回帰モデルの選択が可能となった。著者は1部のモデルについては琵琶湖流入河川と霞ヶ浦流入河川の比較および両者を併せた回帰モデルの検討を行っているが、ここでは霞ヶ浦流入河川を対象に、観測河川数や観測降雨数を倍に補って解析を行なった。

もともとこの回帰モデルは、降雨時流出負荷量観測値の絶対数を補うモデルとして提案したものであり、本来、各河川ごとや流域特性に基いた各河川パターンごとに観測値に基いてパラメータを決定して利用すべき性質のものである。このことは、大河川の観測例を示すことによりその性質を明確化させた。また、ここではT-COD、T-N、T-PのTotalとしての水質項目だけでなく、各懸濁態成分の回帰モデルがより精度の高いモデルとして求められることを示した。さらに、溶存態成分の流出負荷量も同様に回帰モデルが適用できることを示した。溶存物質あるいは溶存態成分の降雨時流出負荷量が懸濁態のそれと比べてかなり小さいけれども、回帰モデルの相関係数は逆に高くなるが多かった。この回帰モデルは、1降雨ごとの降雨時流出負荷量の算定に利用できるが、統計モデルゆえ、1年間のような長期間を対象に一定の降雨量以上の全ての降雨について、大きな降雨は各降雨ごとに、ある範囲内の降雨はその各降雨グループごとに一括して降雨時流出負荷量を算定し、これに晴天時の平均流出負荷量も併せて、期間当りの総流出負荷量の推定に最も有効である。終りに臨み、降雨時流出負荷量の観測に御協力下さった国立公害研究所水質環境計画研究室の方々、大河川の降雨時流出負荷量の観測値を利用させて頂いたの方々に感謝の意を表する次第です。

引用文献：1) 海老瀬(1981)国立公害研・研究報告21号, 2) 海老瀬他(1981)25回水理講演会論文集, 3) 海老瀬他(1979)水質汚濁研究2(1), 4) 海老瀬(1980)環境技術9(4), 5) 市川他(1980)水質汚濁年講14回, 6) 古田他(1980)用水と廃水22(3), 7) 落合他(1981)用水と廃水23(1), 8) 山本他(1980)水質汚濁年講14回。

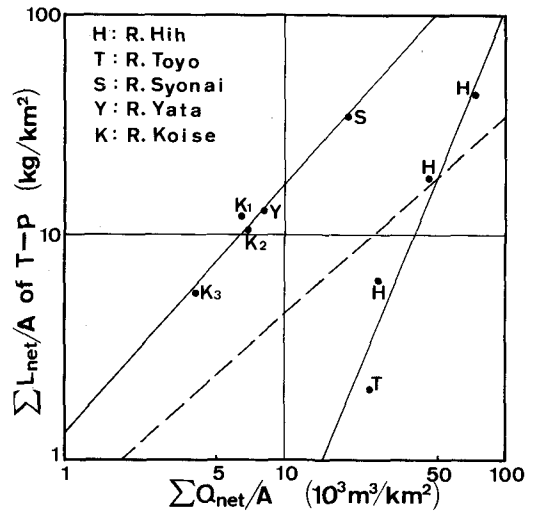


Fig. 10 Relationship between specific cumulative flow and specific cumulative loading of T-P by storm runoff.